

天空冷背景下受力岩石微波辐射特征实验研究

徐忠印¹, 刘善军¹, 吴立新², 车德福¹
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410006)

摘 要: 分析了环境因素对微波辐射观测的影响机理. 以此为基础, 在天空冷背景条件下, 利用岩石试验机、微波辐射计、声发射、温度测试仪等, 开展了岩石弹性变形阶段循环加载微波辐射变化特征的室外观测实验. 结果表明, 在天空冷背景下能可靠获取岩石受力变形过程中的微波辐射能量变化信息. 花岗岩弹性变形阶段的微波辐射亮温变化与应力间呈同步性很强的正相关关系, 相关系数达0.94; 岩石表面的温度变化与应力间亦呈正相关, 但其变化滞后于应力变化, 且单位应力的微波亮温升幅远大于表面温度升幅. 实验证实了利用微波辐射观测手段可有效探测岩石受力引起的岩石内部应力状态的变化.

关 键 词: 遥感-岩石力学; 微波亮温; 天空冷背景; 岩石灾变; 应力变化; 遥感监测

中图分类号: TP 722.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)08-1180-08

Experimental Study on the Microwave Radiation of Stressed Rock Under Cold Sky Background

XU Zhong-yin¹, LIU Shan-jun¹, WU Li-xin², CHE De-fu¹
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410006, China. Corresponding author: XU Zhong-yin, E-mail: xuzhongyin@mail.neu.edu.cn)

Abstract: How environmental factors affect microwave radiation observation was analyzed. Based on the analysis, outdoor experiments were carried out with rock test machine, microwave radiometer, acoustic emission instrument, temperature tester and other equipment to observe microwave radiation characteristics of elastically deformed rock with cyclic loading under cold sky background. Results indicate that the microwave radiation energy changes generated from deformed rock can be detected reliably under cold sky background. In the elastically deformed granite, the microwave radiation energy changes and stress present the positive correlation, with the correlation coefficient of 0.94. The temperature change of the rock surface is positively correlated with the stress too, but the temperature change lags behind the stress change, and the microwave brightness temperature increment is much larger than the surface temperature rise per unit stress. It is verified that the changes in the internal stress state of rock can be detected by microwave observation.

Key words: remote sensing rock mechanics; microwave brightness temperature; cold sky background; rock disaster; stress change; remote sensing monitoring

当应力超过岩石的弹性强度极限时, 岩石就会发生脆性破裂, 引发诸如地震、矿震、岩爆等地质灾害. 因此, 对岩体的应力状态进行监测是预防、预报岩石灾变的一种可行手段. 近年来实验室内观测到的岩石受力破裂过程中微波辐射变化研

究结果, 为微波遥感应用于岩体的应力变化监测带来乐观前景. 邓明德等^[1]在实验室环境下对不同结构的岩石试件进行加载, 发现岩石的微波辐射亮温随应力的增加而增强; 当岩石临破裂时, 各种岩石的微波辐射亮温表现出不同程度的急速升

高, 可视为岩石破裂的微波辐射变化前兆。Maki 等^[2]对石英岩、花岗岩、辉长岩和玄武岩在单轴压缩至破裂过程中的微波辐射变化进行观测, 结果表明, 所有岩石试件在 300 MHz 和 2 GHz 频段均观测到电磁辐射脉冲信号, 在 22 GHz 频段只有石英岩探测到有电磁辐射产生。徐忠印等^[3]在实验室内对受力破裂花岗岩试件进行 37.5 GHz 频段的微波监测, 结果显示, 花岗岩的微波亮温随应力呈现初始阶段微降、弹性阶段上升、塑性阶段下降, 以及临破裂前上升的变化特征。

根据受力岩石的微波监测实验结果所建立的基于 Aqua 卫星 AMSR - E 微波传感器的地震监测系统, 为与岩石破裂有关的地质灾害的监测提供了有力的数据支持。利用该系统的 18.7 GHz 微波数据, Tadashi 等对 2004 年 2 月 24 日摩洛哥 6.3 级地震^[4]及 2008 年 5 月 12 日汶川地震^[5]的微波辐射进行分析, 结果发现, 摩洛哥地震前 2 天以及汶川地震后 1 天在震中及附近出现了微波辐射增强的异常现象。陈昊等^[6]对 AMSR - E 传感器的 18.7 GHz 微波数据进行分析, 发现在 2010 年玉树地震的前 2 天出现微波辐射异常, 异常区域与地震主断裂带分布有明显的空间相关性。Ma 等^[7]应用两步差分法对 AMSR - E 传感器的 18.7 GHz 微波数据进行处理分析, 发现汶川地震前后, 在震中及龙门山断裂带均存在微波辐射异常。Tadashi 等^[8]通过地基微波遥感监测实验研究发现, 火山口悬崖在坍塌过程中引起 300 MHz 的微波信号异常变化。

但由于以往的遥感 - 岩石力学基础实验均在实验室内进行。实验室的墙壁、设备、人员等均会产生电磁辐射和散射。因此, 实验观测数据受环境影响较大, 且难以对实验获取的微波辐射信号进行来源区分和噪声过滤, 实验结果不确定性较大, 直接影响实验结果的正确分析与规律提取, 并且, 实验环境与实际遥感环境也不相符; 同时, 对岩石试件的微波辐射亮温变化与应力之间的相关性缺乏定量分析。基于以上存在的问题, 在分析环境因素对实验结果影响性质的基础上, 本文在室外开展了受力岩石的微波辐射变化实验研究。在岩石的弹性变形阶段采用循环加载的方式, 并对循环加载过程中岩石试件的微波亮温 (microwave brightness temperature, MBT) 变化进行监测, 将去噪后的微波亮温 (denoising microwave brightness temperature, DMBT) 与应力进行相关性分析, 研究 DMBT 变化与应力之间的相关性。同时, 对岩石试件表面温度及加载过程的声发射进行测试,

用以对实验结果进行辅助分析。

1 实验环境对受力岩石微波辐射的影响机理分析

实验室环境下辐射计的观测结果会掺杂周围较强的环境辐射, 给实验结果分析带来困扰。其中, 环境辐射是指样品周围所有物体表面 (例如地面、天花板、压力机的金属表面) 反射或发射的微波辐射; 此外, 实验所使用的仪器设备及实验人员等都是较强的辐射源。这些辐射源都会给实验结果带来不确定性。

在岩石加载实验中, 由于微波辐射计与岩石样品距离较近, 大气衰减及大气上行辐射均可忽略不计。静态岩石的 MBT 计算公式为

$$T_0 = \varepsilon T_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \varepsilon_{\text{sur}} T_{\text{sur}}. \quad (1)$$

式中: T_0 为静态岩石的 MBT; ε 为岩石试件的发射率; T_{obj} 为岩石的物理温度; ε_{sur} 为环境的物理发射率; T_{sur} 为环境的平均物理温度。 $\varepsilon T_{\text{obj}}$ 为岩石本身对辐射计接收的微波辐射贡献, $(1 - \varepsilon) \varepsilon_{\text{sur}} T_{\text{sur}}$ 为岩石周围环境辐射通过岩石的反射对辐射计的贡献。

当岩石受力后, 岩石试件的物理温度、岩石试件的发射率及环境的物理温度都会发生变化, 在岩石加载的某一时刻, 岩石试件的 MBT 为

$$T_1 = (\varepsilon + \Delta\varepsilon) (T_{\text{obj}} + \Delta T_{\text{obj}}) + \varepsilon_{\text{sur}} (1 - \varepsilon - \Delta\varepsilon) (T_{\text{sur}} + \Delta T_{\text{sur}}). \quad (2)$$

式中: ΔT_{obj} 为岩石试件受力后温度变化量; $\Delta\varepsilon$ 为岩石试件发射率变化量; ΔT_{sur} 为环境温度的变化量。

比较式 (1) 及式 (2) 可知, 岩石试件受力后, 其 MBT 变化量为

$$T_1 - T_0 = (\varepsilon + \Delta\varepsilon) (T_{\text{obj}} + \Delta T_{\text{obj}}) + \varepsilon_{\text{sur}} (1 - \varepsilon - \Delta\varepsilon) (T_{\text{sur}} + \Delta T_{\text{sur}}) - \varepsilon T_{\text{obj}} - (1 - \varepsilon) \varepsilon_{\text{sur}} T_{\text{sur}} = \varepsilon \Delta T_{\text{obj}} + \Delta\varepsilon T_{\text{obj}} + \Delta\varepsilon \Delta T_{\text{obj}} + \varepsilon_{\text{sur}} \Delta T_{\text{sur}} - \varepsilon_{\text{sur}} \varepsilon \Delta T_{\text{sur}} - \varepsilon_{\text{sur}} \Delta\varepsilon T_{\text{sur}} - \varepsilon_{\text{sur}} \Delta\varepsilon \Delta T_{\text{sur}}. \quad (3)$$

以下针对两种实验环境进行分析。

1) 如果实验在室内常温下进行, 加载开始时试件温度与环境温度相同, 假设都为 $T = 300 \text{ K}$; 由于加载过程所用时间较短, 故假设环境温度不发生变化, 即 $\Delta T_{\text{sur}} = 0$, 则有

$$T_1 - T_0 = \varepsilon \Delta T_{\text{obj}} + \Delta\varepsilon T_{\text{obj}} + \Delta\varepsilon \Delta T_{\text{obj}} - \varepsilon_{\text{sur}} \Delta\varepsilon T_{\text{sur}} = (\varepsilon + \Delta\varepsilon) \Delta T_{\text{obj}} + \Delta\varepsilon (T_{\text{obj}} - \varepsilon_{\text{sur}} T_{\text{sur}}). \quad (4)$$

由于 $(\varepsilon + \Delta\varepsilon) < 1$, 根据热弹定律及以往岩石

加载过程热红外观测结果,岩石在破裂前因热弹效应引起的温度变化在 0.2 K 左右. 另外岩石的发射率一般在 0.9 左右,室内一般混凝土墙体的发射率也在 0.9 左右,因此有

$$T_1 - T_0 \approx 0.2 \text{ K} + \Delta\varepsilon \times (300 \text{ K} - 0.9 \times 300 \text{ K}) = 0.2 \text{ K} + \Delta\varepsilon \times 30 \text{ K}. \quad (5)$$

2) 如果环境为天空背景,在 C 波段微波辐射计以零度入射角观测时,天空背景 MBT 接近 $5 \text{ K}^{[9]}$, 即 $T_{\text{sur}} \ll T_{\text{obj}}$. 故将室外天空背景称为“天空冷背景”. 假设加载开始时试件温度为 300 K,加载过程中环境保持稳定,其温度变化量为 0,则有

$$T_1 - T_0 \approx 0.2 \text{ K} + \Delta\varepsilon \times 295 \text{ K}. \quad (6)$$

目前,尚缺乏对岩石受力过程中微波发射率变化的定量研究. 岩石发射率主要取决于其介电常数 ε , 对于岩石类材料, ε 与矿物成分、含水量、岩石结构等因素有关^[10].

弹性变形阶段岩石的发射率变化主要由其内部结构变化引起,此时,其内部质点发生位移,但相互间的连续性并未受到破坏,只是大小和形状发生变化. 对于含有较多孔隙的岩石(如沉积岩中的砂岩、火成岩中的喷出岩等),其为两相介质:一相为孔隙介质(真空或空气);一相为纯岩石介质. 受压时,孔隙体积减小,岩石介质密度相对增加. 根据 Ulaby 等^[10]研究成果,此时岩石的介电常数 ε 实部可表达为

$$\varepsilon = (\varepsilon_s)^{\rho_b/\rho_s}. \quad (7)$$

式中: ε_s 为同种岩石在不含孔隙时的介电常数实部; ρ_b 为岩石含孔隙时的密度; ρ_s 为岩石不含孔隙时的密度. 式(7)表明,介电常数与岩石密度正相关,岩石的介电常数随压力的增加而增加. 当含孔隙岩石在孔隙压密后,介电常数变大,使得岩石的反射率增大,发射率减小,从而 MBT 减小.

如果岩石内部孔隙较少(如具有品质结构的岩石),受力时会使晶格键伸长或缩短. 陈志雄^[11]对陶瓷材料在不同压力下介电常数的测试结果表明,压力增加引起介电常数减小,二者间呈负线性关系;并解释为:压力增大,周围最邻近离子向受压离子靠拢,受压离子的位移受到限制,可极化性降低,故介电常数减小.

花岗岩内部孔隙较少,在弹性变形阶段随应力的增加,其晶格键缩短,介电常数减小,相应的发射率增加,从而引起 MBT 上升. 对比式(5)和式(6)可知,由岩石发射率的变化 $\Delta\varepsilon$ 所引起的 MBT 的变化量,式(6)的 MBT 变化值要大于式(5)的 MBT 变化值.

由上述理论分析可知,在天空冷背景下观测

岩石加载过程的微波辐射,其观测值理论上要大于室内常温环境下的观测值,即天空冷背景下探测岩石受力变化所引发的微波辐射实验效果更佳,更容易探测到岩石的应力状态及微波辐射异常变化.

2 实验设计

2.1 实验设备

1) 卧式加载试验机:水平加载方式且具有微机伺服控制功能的双向加载卧式岩石试验机(YAW5000 型). 试验机技术参数:①轴向最大试验力可达 5 MN,试验力精确度小于或等于 $\pm 1\%$; ②变形测量精度小于或等于示值的 $\pm 0.5\%$; ③变形测量分辨率 0.001 mm;④侧压的最大荷载 100 kN.

2) 微波辐射计: C 波段微波辐射计,频率为 6.6 GHz,温度灵敏度为 0.1 K,定标精度 0.5 ~ 1.5 K. 实验时设备的数据采样速度为 1 帧/s.

3) 声发射仪:双通道 PCI-2 声发射仪,探测频率为 1 kHz ~ 3 MHz.

4) 温度探测仪: TWC-2A 铂电阻多路温度测试仪,测量精度 $\pm 0.3\% \text{ rdg} + 1^\circ\text{C}$,温度分辨率 0.01 $^\circ\text{C}$,测量范围 0 ~ 100 $^\circ\text{C}$.

2.2 实验样品

使用自然界广泛分布的花岗岩作为岩石试件,花岗岩矿物成分主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母等矿物组成,粒径在 3 ~ 5 mm,等粒结构. 试件为 46 cm \times 25 cm \times 15 cm 的长方体.

2.3 实验方法

为验证上述实验环境对受力岩石微波辐射的影响机理分析,受载岩石的微波观测实验分别在室外及室内环境下进行. 为避免太阳照射造成试件温度变化而引起试件的微波辐射变化,室外实验选择在晚间进行. 由于 C 波段微波辐射计的喇叭天线口面较大(25 cm \times 15 cm),为防止实验过程中试件以外的目标进入天线范围,将辐射计垂直试件表面放置,距离表面 5 cm,使得辐射计接收的辐射全部来自于岩石试件. 在试件上表面微波监测范围的左、右两侧安放 2 个温度探头,用于监测加载过程中试件表面的温度变化;此外,在试件端部微波辐射监测范围之外放置一小块相同的岩石,作为参考试件,同样测试其表面温度,用于了解加载过程环境温度变化情况,以剔除环境温度变化对试件表面温度测试结果的影响. 实验前将各种设备的时钟调整为一致,并同时开始和结

束实验数据采集. 实验的试件及部分测试探头示意图及现场安置图如图 1 所示. 在压头与试件间夹衬聚四氟乙烯垫片, 用于减少压头对试件的传热. 加载前先进行一段时间的观测, 待各种设备稳

定工作后开始实验. 实验时, 利用加载试验机对岩石试件进行加载, 使用微波辐射计、声发射仪、温度测试仪测试岩石试件的微波辐射、声发射和表面温度的变化, 并记录相应数据.

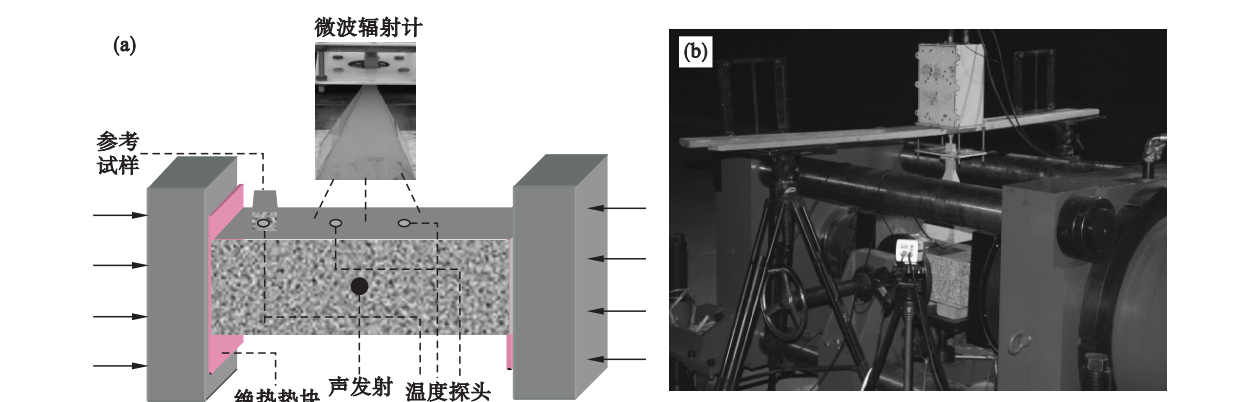


图 1 受载岩石的微波辐射观测实验系统示意图与现场安置图

Fig. 1 Schematic diagram and field scene of experiment system for observing microwave radiation of loaded rock
(a)—示意图; (b)—现场图.

为研究岩石的微波辐射变化与应力之间的关联性, 采用循环加载的方式对岩石在弹性变形阶段进行加载, 使应力呈阶段性的上升、下降, 以验证微波辐射变化的应力关联性. 为确保循环加载是在岩石试件的弹性变形范围内进行, 首先需要确定循环加载的峰值载荷. 具体方法为: 对同一批岩石样本制作的相同尺寸的试件进行多次加载测试, 根据所得应力-应变曲线及抗压强度来确定该批试件的弹性极限. 多次实验结果显示, 试件的峰值载荷多在 2 000 ~ 2 600 kN 之间; 进而, 按峰值载荷的 60% 来确定试件的弹性上限即循环加载的峰值载荷, 为 1 200 kN.

据此设计循环加载实验方案: ①按照 10 kN/s 的加载速率从 100 kN 加载至 1 200 kN, 对应的应力区间为 2.67 ~ 32.0 MPa; ②维持 1 200 kN 峰值载荷 30 s; ③按相同速率卸载到 100 kN; ④按上述方式进行一次循环加载. 本次实验中, 在室内及室外环境下分别使用 3 块岩石试件进行重复实验, 并对试件施加了 40 kN 的恒定侧压.

3 实验结果与分析

3.1 室外实验结果

岩石由各种矿物组成, 由于结构、矿物和缺陷等影响, 使得岩石试样局部的应力分布不是均匀的, 实际上试样内任何一点的应力都可能不同, 测试获得的平均应力不能代表试样内部任何一点的应力, 但代表着一个平均的等效值, 文中统一用应

力表示.

3.1.1 微波测试结果

为分析不同应力状态、不同循环加载方式下微波辐射与应力的关联性, 将岩石循环加载过程按应力的变化划分为上升 1—下降 1—上升 2—下降 2 四个阶段及三个循环, 即循环 1、循环 2 及循环 3, 见图 2 所示. 图 3 为循环加载过程中试件 C 波段 MBT 观测结果. 可见, 尽管 MBT 噪声波动较大, 但其变化趋势与应力变化一致, 且呈现清晰的循环变化态势. 使用小波分析方法对 MBT 进行去噪处理后得到 DMBT, 呈现出与应力非常一致的平滑变化, 见图 3 中的虚线. 将各试件去噪后的 DMBT 分别在四个阶段及三个循环期间与应力进行相关分析, DMBT 与应力的相关系数、DMBT 变化幅值、单位应力微波变化幅值结果统计值见表 1、表 2. 由表 1 统计数据可知, 在应力上升阶段, DMBT 随应力的增加而增加; 应力下降阶段, DMBT 随应力的下降而减小. DMBT 随应力的变化而变化, 二者呈现高度线性正相关, 线性相关系数均值高达 0.99. DMBT 在应力上升阶段的变化幅值略大于下降阶段的变化幅值. 四阶段 DMBT 平均变化幅值为 0.52 K, 单位应力变化幅值为 0.018 K/MPa. 由表 2 统计数据可见, DMBT 在三循环过程中与应力亦呈现高度正相关, 相关系数均值达 0.97, DMBT 平均变化幅值为 0.58 K, 单位应力变化幅值为 0.020 K/MPa. 全循环过程中, DMBT 与应力的相关系数均值为 0.94.

上述实验结果表明,在应力上升阶段、下降阶段及循环过程中,岩石试件 DMBT 的变化均与应力呈现高度正相关。

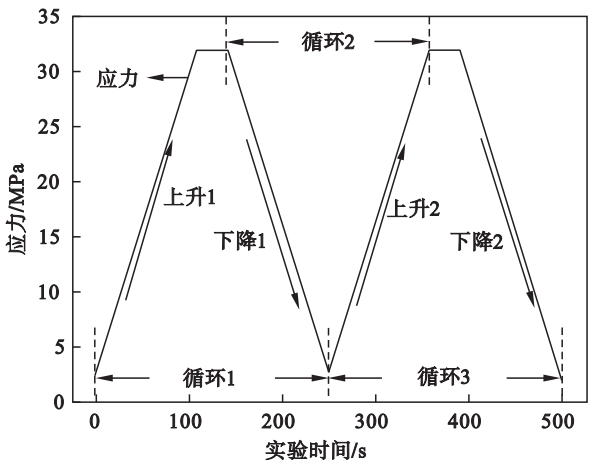


图 2 室外循环加载阶段划分

Fig. 2 Phase division in process of cyclic loading

3.1.2 温度测试结果

为便于了解岩石加载过程的热变化,用温度探测仪探测了岩石加载过程中试件表面的物理温度变化.将微波辐射计左、右 2 个温度探头的温度测试结果减去参考试件的温度变化值,用以剔除环境温度变化对试件表面温度测试结果的影响,然后对试件表面微波观测范围内的 2 个温度探头的温度测试结果取均值,将其进行去噪处理后与应力进行对应分析.图 4 为试件 HG-1 表面温度取均值后的温度测试结果.可见,温度测试结果受仪器本身噪声的影响而产生波动,但温度随应力的变化趋势是基本一致的,即受压时温度上升,卸压时温度下降,温度与应力成正线性相关,符合热弹定律.去噪处理后,表面温度(曲线)呈现出与应力一致的平滑变化,两者的相关系数为 0.75.值得注意的是,岩石表面物理温度变化滞后于岩石应力变化,这是因为岩石热弹效应导致的岩石内部物理温度增量更大(内部应力高于表面应力),其传递到试件表面是个热传导过程.若将温度曲线向左平移 25 s,则两者的相关系数提升为 0.88.去噪后的温度变化幅值为 0.025 ℃左右,对应峰值应力 32 MPa,计算可得本次双轴加载试验条件下花岗岩热弹致热率为 0.000 8 ℃/MPa.试件 HG-2, HG-3 表面温度测试结果与 HG-1 的基本相同。

3.1.3 声发射测试结果

为判断循环受载岩石的内部是否有宏观裂隙产生,以确保岩石处于弹性变形阶段,对循环受力的岩石试样进行声发射测试.图 5 为试件 HG-1 循环加载过程中的声发射观测结果.可见,在第一

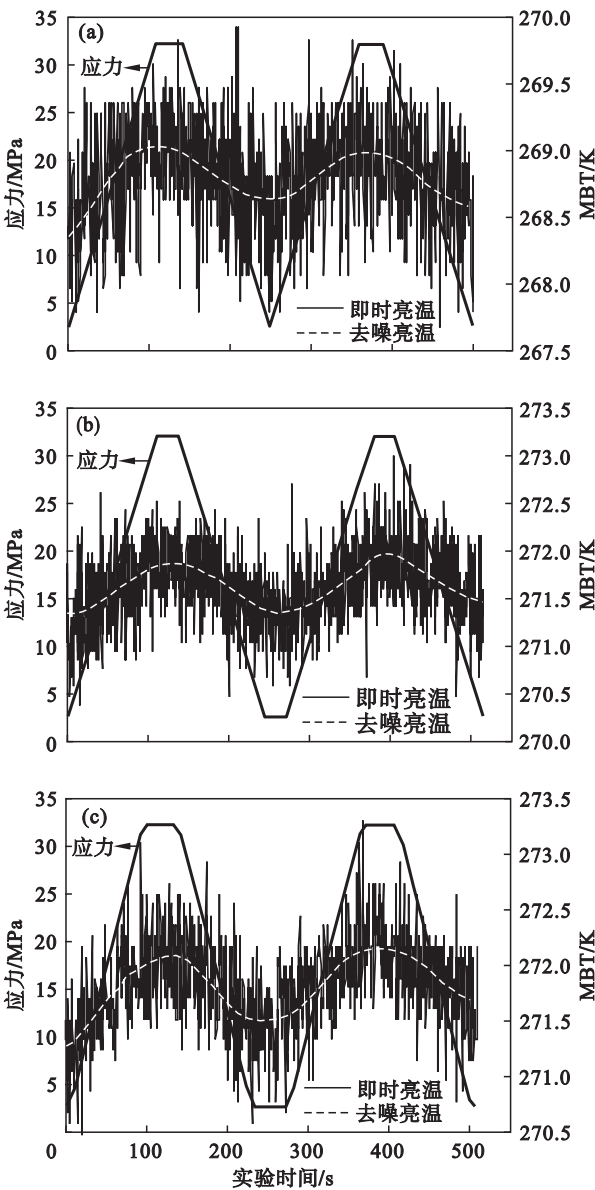


图 3 室外循环加载过程试样 MBT 变化曲线

Fig. 3 Variation of MBT of sample in process of cyclic loading

(a)—HG-1; (b)—HG-2; (c)—HG-3.

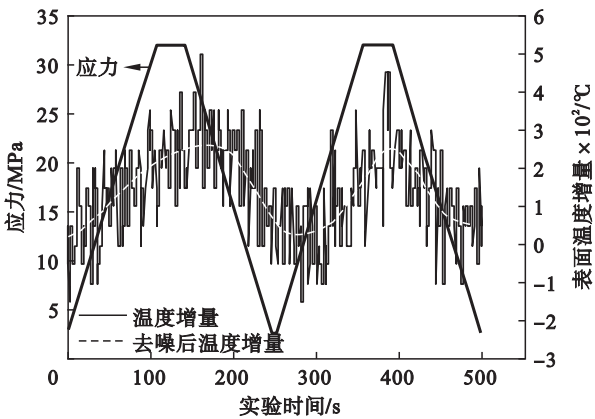


图 4 试样 HG-1 表面温度增量变化

Fig. 4 Surface temperature increment of sample HG-1

表 1 试样加载过程四阶段的 DMBT 与应力相关性计算结果统计表
Table 1 Calculated results of DMBT and stress correlation of samples during four phase loading

试件 编号	DMBT 与应力相关系数					DMBT 变化幅值/K					单位应力 DMBT 平均变化幅度
	上升 1	下降 1	上升 2	下降 2	均值	上升 1	下降 1	上升 2	下降 2	均值	K·MPa ⁻¹
HG-1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.73	0.37	0.33	0.39	0.46	0.016
HG-2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.50	0.48	0.56	0.50	0.51	0.017
HG-3	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.74	0.57	0.61	0.46	0.60	0.020
均值	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.66	0.47	0.50	0.45	0.52	0.018

表 2 试样循环加载期间 DMBT 与应力相关性计算结果统计表
Table 2 Calculated results of DMBT and stress correlation of samples during cyclic loading

试件 编号	DMBT 与应力相关系数					DMBT 变化幅值/K					单位应力 DMBT 平均变化幅度
	循环 1	循环 2	循环 3	均值	全循环过程	循环 1	循环 2	循环 3	均值		K·MPa ⁻¹
HG-1	0.96	0.98	0.98	0.97	0.95	0.68	0.37	0.36	0.47		0.016
HG-2	0.97	0.98	0.96	0.97	0.96	0.54	0.57	0.62	0.58		0.020
HG-3	0.96	0.99	0.98	0.98	0.92	0.81	0.58	0.62	0.67		0.023
均值	0.97	0.98	0.97	0.97	0.94	0.68	0.51	0.53	0.58		0.020

个循环的应力上升阶段,声发射事件率总体较高,并发生较大波动;当应力下降时,声发射事件率迅速下降并接近于零.这表明在应力上升阶段岩石发生微破裂,而应力下降阶段很少发生微破裂.在第一个加载循环之后的应力上升与下降阶段,声发射事件率均很低;仅在应力转折阶段,声发射有小的波动,且随着循环的延续,转折阶段的声发射事件率幅度逐渐降低.以上表明,循环加载过程中花岗岩内部未出现宏观裂隙,岩石试样处于弹性变形阶段,声发射事件率变化符合 Kaiser 效应.

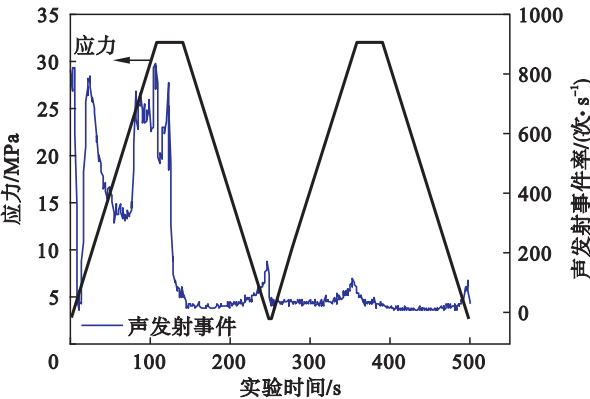


图 5 试样 HG-1 声发射探测结果
Fig. 5 Acoustic emission from sample HG-1

3.2 与室内实验结果对比

采用与室外循环加载实验相同的方法,在室内对花岗岩试件 HG-4, HG-5, HG-6 进行循环加载过程的综合观测实验,测试内容也与室外加载实验完全相同.微波测试结果以 HG-4 为例,图 6a 为循环加载过程 C 波段微波测试结果.可见,虽经小波去噪处理,但 DMBT 与应力并没有同步变化迹象,微波亮温与应力的相关系数仅为 -0.07. 花岗岩试件 HG-5, HG-6 的 DMBT 与应力相关系数分别为 -0.05, 0.09, 远低于室外天空冷背景下的 0.94, 表明实验环境对微波观测有重要影响. 室内实验的温度、声发射测试结果与室外实验的测试结果相似. 图 6b 为试件 HG-4 表面温度取均值后的温度测试结果. 对表面温度测试结果进行去噪处理,去噪后的温度呈现出与应力基本一致但略微滞后的平滑变化,即受压时温度上升,卸压时温度下降,符合热弹定律. 温度与应力成正线性相关,两者的相关系数为 0.64; 温度曲线向左平移 34 s 之后,两者的相关系数为 0.89. 试件 HG-5, HG-6 表面温度测试结果与 HG-4 基本相同. 图 6c 为试件 HG-4 声发射观测结果,循环加载过程中花岗岩的声发射事件率变化与室外实验结果相似.

通过室内外实验结果对比分析,验证了第 2 节理论分析的结论:在天空冷背景下进行岩石加载过程的微波辐射观测时,所探测到的微波辐射信号大于室内常温环境的观测值,即天空冷背景下探测岩石受力变化所引发的微波辐射的实验效果更好,更容易探测到岩石的应力状态及微波辐射异常变化。

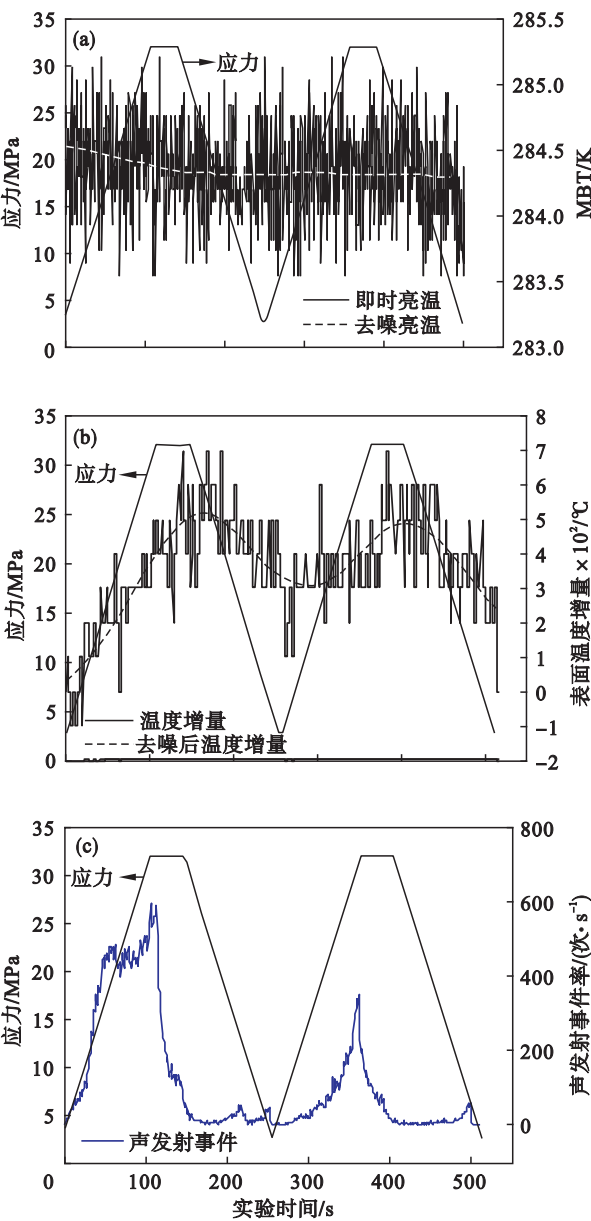


图 6 室内循环加载过程试样 HG-4 的观测结果
Fig. 6 Observed results of sample HG-4 in process of cyclic loading indoors

4 实验观测结果分析

本次实验中,岩石弹性变形阶段循环加载过程中应力呈上升—下降的循环变化特征。在应力上升阶段,由热弹效应引起温度随应力增加而上

升,且岩石晶格键随应力增加而缩短,致使发射率变大;在正的热弹效应和发射率变大的共同作用下,岩石试件 MBT 呈上升趋势。在应力下降阶段,由热弹效应引起温度随应力减小而下降,且岩石晶格键随应力减小而拉长恢复,致使发射率变小;在负的热弹效应和发射率减小的共同作用下,岩石试件 MBT 呈下降趋势。因此,在岩石试件弹性变形阶段的循环加载过程中,岩石试件的 MBT 与应力正相关,随应力发生循环变化。本次实验由岩石室外冷背景加载综合测试实验结果可见: MBT 和表面温度均与应力正相关,但 MBT 与应力的同步性更好,且 MBT 单位应力升降幅度远大于表面物理温度单位应力的升降幅度。其原因为:由于热弹效应引起的岩石内部温升传递到试件表面需要时间,致使试件表面温度变化相对于应力变化滞后,而微波的穿透性使得 MBT 与应力呈现出较好的同步性。由于微波具有穿透性,MBT 更能体现岩石内部热弹效应引起的物理温度变化,且 MBT 变化还受岩石发射率变化(内部孔隙体积和晶格键长度变化所致)的影响,导致 MBT 单位应力升降幅度大于表面物理温度的升降幅度。

5 结 论

- 1) 在花岗岩弹性变形阶段,其 MBT 变化与应力间呈现高度正相关关系。在应力上升及下降阶段,去噪后的 MBT 与应力的相关系数高达 0.99;在循环期间,相关系数为 0.94。
- 2) MBT 的单位应力升幅为 0.018 K/MPa,远大于表面温度升幅(0.000 8 $^\circ\text{C}$ /MPa)。
- 3) 与表面温度变化相比,MBT 变化与应力变化具有更好的同步性。

参考文献:

[1] 邓明德,樊正芳,崔承禹,等. 无源微波遥感用于地震预报的实验研究[J]. 红外与毫米波学报,1995,14(6):401-406.
(Deng Ming-de, Fan Zheng-fang, Cui Cheng-yu, et al. The experimental study for earthquake prediction by passive microwave remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1995, 14(6): 401-406.)

[2] Maki K, Takano T, Souma E. An experimental study of microwave emissions from compression failure of rocks[J]. *Journal of the Seismological Society of Japan, Second Series*, 2006, 58(4): 375-384.

- [3] 徐忠印,刘善军,吴立新. 岩石变形破裂红外与微波辐射变化特征对比研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015, 36(12):1738 – 1742.
- (Xu Zhong-yin,Liu Shan-jun,Wu Li-xin. Comparative study on the variation features of infrared and microwave radiation in deformation and fracture process of rock [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36 (12) : 1738 – 1742.)
- [4] Takano T, Maeda T T. Experiment and operational evidence of earthquake detection capability by means of microwave passive sensors on satellite[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2009,6(1):107 – 111.
- [5] Maeda T, Takano T. Detection of microwave signals associated with rock failures in an earthquake from satellite-borne microwave radiometer data [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, 2009:61 – 64.
- [6] 陈昊,金亚秋. 星载微波辐射计对玉树地震岩石破裂辐射异常的初步检测[J]. 遥感技术与应用,2010,25(6):860 – 866.
- (Chen Hao,Jin Ya-qiu. A preliminary detection of anomalous radiation of rock failures related with Yushu earthquake by using satellite-borne microwave radiometers [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25 (6) : 860 – 866.)
- [7] Ma Y T, Liu S J. Two-step method to extract seismic microwave radiation anomaly: case study of M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Science*, 2011, 24: 577 – 582.
- [8] Takano T, Maeda T. Detection of microwave emission due to rock fracture as a new tool for geophysics[J]. *Japan Journal of Applied Geophysics*,2013,94:1 – 14.
- [9] Wang J R, O’ Neill P E, Jackson T J, et al. Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,1983,21(1):44 – 51.
- [10] Ulaby F T, Bengal T H, Dobson M C, et al. Microwave dielectric properties of dry rocks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,1990,28(3):325 – 336.
- [11] 陈志雄. 低温下压力对 KTaO_3 陶瓷介电常数的影响 [J]. 硅酸盐学报,1988,16(1):13 – 18.
- (Chen Zhi-xiong. Effect of pressure on dielectric constant of KTaO_3 ceramics at low temperature [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*,1988,16(1):13 – 18.)